

优化施肥方式对黄土高原新增耕地土壤 有机质含量和团聚体特性的影响

刘哲^{1,2,3,4}, 张 扬¹, 雷 娜^{1,2,3,4},
张庭瑜^{1,2,3,4}, 熊宇斐^{1,2,3,4}, 张盼盼^{1,2,3,4}, 黎雅楠^{1,2,3,4}

(1.陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075;

2.自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710021; 3.陕西地建土地工程
技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710021; 4.陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安 710075)

摘 要: [目的] 研究优化施肥对黄土高原地区新增耕地土壤质量和作物产量的影响, 为新增耕地土壤建立合理的优化施肥处理和区域新造土地的健康可持续发展提供理论依据。[方法] 通过盆栽种植试验, 评估有机肥处理(OF)、有机肥配施化肥处理(NP)、常规施肥处理(CF)对新增耕地土壤团聚体数量、结构稳定性、有机质含量和玉米产量的改良效应。[结果] CF处理下新整治耕地土壤有机质含量最低为 7.08 g/kg, 土壤水稳性大团聚含量低, 结构稳定性差。与 CF 处理相比, 优化施肥方式下的 OF 和 NP 处理显著提高了新增耕地土壤有机质含量和玉米产量($p < 0.05$), > 0.25 mm 粒级大团聚含量和团聚体稳定性显著提升, 其中 OF 处理对新整治耕地土壤团聚体数量和稳定性的改善效果最佳。在 0—10 cm 土层, OF 和 NP 处理下土壤有机质含量分别为 12.67, 11.79 g/kg, 比 CF 处理分别提高了 46.2% 和 36.1%。OF 处理下水稳性团聚体 MWD, GMD, $R_{0.25}$ 值分别比 CF 处理高了 62.5%, 21.4% 和 148.3%, 分形维数比 CF 处理降低了 1.7%; NP 处理下水稳性团聚体 MWD, GMD, $R_{0.25}$ 值分别比 CF 处理高了 18.8%, 3.6% 和 40.9%, 分形维数比 CF 处理降低了 0.4%。在 10—20 cm 土层, OF 和 NP 处理下土壤有机质含量、团聚体数量和结构稳定性也得到一定的提升。土壤有机质含量与团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)呈显著正相关关系($p < 0.001$)。[结论] 优化施肥是有利于提升新整治耕地土壤结构稳定性、保肥特性和土地生产力的有效措施。

关键词: 优化施肥; 新增耕地; 土壤有机质; 土壤团聚体

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)05-0099-08

中图分类号: S152.4, S158.3

文献参数: 刘哲, 张 扬, 雷 娜, 等. 优化施肥方式对黄土高原新增耕地土壤有机质含量和团聚体特性的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 99-106. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.014; Liu Zhe, Zhang Yang, Lei Na, et al. Effects of optimized fertilization treatments on soil aggregate characteristics and organic matter content of newly reclaimed cultivated land in Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 99-106.

Effects of Optimized Fertilization Treatments on Soil Aggregate Characteristics and Organic Matter Content of Newly Reclaimed Cultivated Land in Loess Plateau

Liu Zhe^{1,2,3,4}, Zhang Yang¹, Lei Na^{1,2,3,4}, Zhang Tingyu^{1,2,3,4},
Xiong Yufei^{1,2,3,4}, Zhang Panpan^{1,2,3,4}, Li Ya'nan^{1,2,3,4}

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi

710075, China; 2. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering,
the Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 3. Institute of Land Engineering and

Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710021, China;

4. Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: [Objective] The effects of optimizing fertilization on improving soil quality and crop yield of newly

收稿日期: 2021-04-29

修回日期: 2021-06-30

资助项目: 陕西省土地工程建设集团内部科研项目“不同有机物料处理下土壤团聚体稳定性的内力作用机制”(DJNY2020-25); 陕西省创新人才推进计划—青年科技新星项目(2020KJXX-051)

第一作者: 刘哲(1987—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事土壤质量提升及水资源高效利用研究。Email: liuzhe168@126.com。

通讯作者: 张 扬(1984—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事土地工程研究工作。Email: 104071897@qq.com。

cultivated land were studied in order to provide a theoretical basis for the establishment of reasonable optimized fertilization recommendations and the sustainable development of newly reclaimed cultivated land in the Loess Plateau. [Methods] The improvement effects of organic fertilizer (OF), organic fertilizer combined with chemical fertilizer (NP), and conventional fertilization (CF) on soil organic matter (SOM), soil aggregate distribution, structure stability, and corn yield in newly reclaimed cultivated land were evaluated using pot experiments. [Results] SOM content of newly reclaimed cultivated land was the lowest (7.08 g/kg) under CF, with low aggregate content and poor structural stability. OF and NP significantly increased SOM content of the newly reclaimed cultivated land ($p < 0.05$) compared with CF. The particle size > 0.25 mm aggregate concentration ($R_{0.25}$) and aggregate stability were also significantly improved. The OF treatment had the greatest effect on improving the quantity and stability of soil aggregates. In the 0—10 cm soil layer, the SOM content under OF and NP treatments was 12.67 g/kg and 11.79 g/kg, respectively, which was 46.2% and 36.1% higher than SOM under CF. Moreover, the mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and $R_{0.25}$ values of water-stable aggregates under OF were 62.5%, 21.4%, and 148.3% higher, respectively, than those values under CF, and the fractal dimension (D) was 1.7% lower than under CF. Meanwhile, the MWD, GMD, and $R_{0.25}$ values under NP were 18.8%, 3.6%, and 40.9% higher, respectively, than those values under CF, and the D value was 0.4% lower than under CF. In the 10—20 cm soil layer, the SOM content and the quantity and structural stability of soil aggregates under OF and NP were also increased to a certain extent. The MWD, GMD, and the SOM content showed significant positive correlations ($p < 0.001$). [Conclusion] Optimizing fertilization is an effective measure for improving soil structure stability, fertility retention characteristics, and land productivity in newly reclaimed cultivated land.

Keywords: optimizing fertilization; newly reclaimed cultivated land; soil organic matter; soil aggregates

土壤结构的改善及肥力提升对于黄土高原生态脆弱区的生态安全保障与耕地产能提升具有重要的作用^[1-2]。而随着城镇化、退耕还林工程的实施,该地区面临耕地数量急剧减少、土壤质量退化、人地矛盾加剧的严重问题,为适时的补充耕地资源,保障粮食安全,该地区开展了大量的新增耕地整治项目^[3-4]。在土地整治过程中,造地土壤主要来源于梁、崩深层未经熟化的生土,有时难免会将表层土壤与底层未经熟化的土壤混合整平,造成工程新增耕地的土壤存在熟化水平低,土壤结构脆弱不稳定,生产力低下等问题,与传统耕种多年的土壤有所差异,严重制约着新增耕地的生态效应和生产能力,因此如何提升黄土高原沟壑区新增耕地的土壤结构稳定性和肥力来达到改善当地生态环境和土地产能的研究是当前亟需解决的新的任务^[5-7]。优化施肥方式是影响土壤性质和农作物生长发育的关键农业管理措施之一,长期不同的优化施肥处理,不仅影响土壤的肥力状况和土地生产力,而且对于土壤的健康可持续发展发挥着重要作用^[8-9]。近些年的农业生产实践活动中,仍然存在着滥用化肥的严重问题,不仅造成土壤团粒结构破坏和土壤板结,而且导致大量的养分资源浪费,化肥的增产效应降低,损耗增大,最终进一步加剧了土壤、大气及地下水的污染问题的发生,严重影响着未来土地的

健康可持续发展^[10-11]。因此,化肥的减量使用和优化施肥方式的应用研究对于新增耕地土壤产能提升和可持续发展具有重要的意义。

有机肥富含有机物质和多种营养元素,肥效持久,能够有效的改善土壤结构,提高土壤微生物和酶的活性,有助于施肥方式的优化和化肥的减量施用,在改善新整治耕地质量和保护生态环境方面发挥着重要的作用^[12-13]。Xin等^[14]研究得出,有机肥施用不仅可以显著增加水稳性大团聚体的含量,提升土壤肥力,而且有助于提高土壤的生产力和维持作物产量的可持续性。吕欣欣等^[15]研究表明,有机肥配施化肥或单施有机肥可以有效的改善棕壤结构稳定性,提高土地的生产力。而新增耕地后期的种植管理过程中,普遍以施用化肥为主,长期的化肥投入导致土壤有机质和有效养分含量失衡,土壤团聚体数量和结构稳定性下降,破坏了土壤的多级孔隙和微生物群落,不利于土壤的快速熟化和可持续发展,其物理和化学性质以及农作物生长将受到严重影响^[3,16]。目前,关于不同优化施肥方式和化肥有机替代对新增耕地肥力提升的研究较少,因此,为了构建新增耕地土壤良性发展的优化施肥方式,以提升新增耕地的土壤肥力与结构稳定性,本研究以具有代表性的土壤团聚体和有机质指标来反映新增耕地土壤的质量变化,对比研究不同的施肥处理对新增耕地土壤团聚体数量、结构稳定性、有机

质含量变化和作物产量的影响,评估土壤有机质含量与团聚体结构稳定性 MWD 和 GMD 指标间的相关性,以为新增耕地土壤建立合理的优化施肥处理和区域新造土地的健康可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试土样

长期定位试验点设置在陕西省富平县试验基地(34°42'N,109°12'E),该研究区属渭北黄土高原沟壑区,气候类型为大陆性温带半干旱、半湿润气候区,年均气温为 13.4 °C,年光能辐射总量为 518.6~535.0 kJ/cm²,干湿季节分明,自然条件可以满足农作物的生长需求。供试土样类型为黄土母质发育成的黄壤土,是新增耕地土地整治的土壤类型,存在结构稳定性差、熟化度低、肥力水平差的严重问题。0—20 cm 土层新增耕地土壤基本理化性质如下:质地类型为粉砂壤土(USDA),其中砂粒(0.05~2 mm)质量分数为 17.06%,粉粒(0.002~0.05 mm)的质量分数为 75.38%,黏粒(<0.002 mm)质量分数为 7.56%,pH 值为 8.20,电导率值为 284 us/cm,阳离子交换量为 8.90 cmol/kg,有机质含量为 6.78 g/kg,有效磷含量为 6.5 mg/kg,速效钾含量为 101.9 mg/kg;>2, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5, <0.25 粒级水稳性团聚体的质量分数分别为 0.67%, 0.84%, 1.67%, 3.55%, 93.27%, 水稳性团聚体结构稳定性指标 MWD, GMD, $R_{0.25}$ 和 D 值分别为 0.30 mm, 0.27 mm, 6.73% 和 2.99。

1.2 试验设计

本研究采用了盆栽试验的研究方法,在 2017 年 7 月开始进行不同优化施肥处理试验。试验共设置 3 种施肥处理:有机肥施肥处理(OF, 有机肥配施化肥处理(NP), 常规施肥处理(CF), 每种处理设置 6 个重复。盆栽规格为顶部直径 48 cm, 底部直径 36 cm, 高 42 cm, 土样自然风干后剔除石砾等杂质, 过 5 mm 筛后混匀备用, 每盆装土约 40 kg, 盆栽边缘设置有通气管。常规施肥方式只施用化学肥料, 有机肥配施化肥处理施用 70% 的有机肥和配施 30% 的化肥, 有机肥施肥处理只施用有机肥, 3 种施肥处理以等氮量(240 kg/hm)的方式施入土壤, 通过养分量转换成有机肥和化肥的实物量后, 按照处理的不同比例进行施用。化学肥料采用尿素、磷酸二铵和硫酸钾, 有机肥采用当地常用的腐熟羊粪。肥料的用量依据当地农业实践的推荐施肥量, 施肥前测定有机肥的氮磷钾含量。有机肥及磷钾肥全部基施, 氮肥 50% 用量基施, 50% 用量根据作物的生长周期和气候条件进行追施, 浇水量、病虫害防治等其他管理措施与水平保持

一致。作物种植制度为油菜—玉米轮作制度, 采用人工播种的方式, 播种前有机肥和化肥均匀的撒在土壤表面, 然后通过耕作将有机肥和矿质肥料拌入到 0—20 cm 的表土中, 追肥采用相同的施肥方式。每盆玉米种植过程中点播种子 3 粒, 待出苗后于玉米 3 叶期进行间苗, 每盆只预留 1 株长势健壮的玉米苗。

1.3 样品采集与指标测定

土壤样品在 2019 年 9 月底玉米收获后, 分 0—10 cm 和 10—20 cm 采集原状土样和混合土样, 在采集和运输土样的过程中避免对土壤团聚体结构的影响, 然后带回实验室自然风干后剔除根系、石砾等杂质后进行团聚体、有机质等指标的检测。土壤有机质含量采用重铬酸钾—外加热法测定^[17], 0—20 cm 土层土壤团聚体的粒级分布和稳定性采用湿筛法和干筛法测定^[18-19], >0.25 mm 大团聚体($R_{0.25}$), 平均重量直径(MWD), 几何平均直径(GMD)和分形维数(D)详细计算见公式(1)—(4)和相关参考文献^[20-21]。在玉米成熟后, 根系生物量、地上部分生物量、百粒重及单株产量采用常规称重法测算, 将玉米根系和地上植株晒干, 分别装袋后于烘箱中烘干至恒重后称重, 玉米百粒重及单株产量在玉米收获后将籽粒烘干后称取记录。

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} = 1 - \frac{M_{r\leq 0.25}}{M_T} \quad (1)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \tau_i)}{\sum_{i=1}^n \tau_i} \quad (2)$$

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n \tau_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i}\right) \quad (3)$$

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{max}}\right)^{3-D} \quad (4)$$

1.4 数据分析

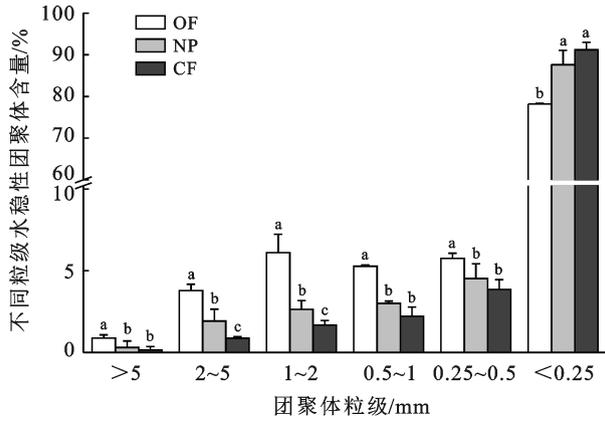
试验数据由 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件进行处理和分析。采用 SigmaPlot 12.5 软件进行图形绘制与生成。通过 IBM SPSS Statistics 22.0 采用 LSD 法对试验数据进行显著性统计分析, 显著性检验水平 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 优化施肥方式对新增耕地土壤水稳性团聚体分布的影响

优化施肥方式对不同粒级土壤水稳性团聚体的分布产生了显著的影响(图 1—2)。与常规施肥处理(CF)相比, 在 0—10 cm 土层, 有机施肥处理(OF)下

>5, 2~5, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5 mm 粒级水稳性团聚体显著增加, <0.25 mm 粒级团聚体显著减少 ($p < 0.05$); 有机肥配施化肥处理 (NP) 下 2~5, 1~2 mm 粒级团聚体显著增加, 其他粒级团聚体变化差异不是很显著 (图 1)。



注: ①OF 为有机施肥; NP 为有机配施化肥; CF 为常规施肥;
②小写字母表示优化施肥处理下差异显著性 ($p < 0.05$), 下同。

图 1 优化施肥处理下 0—10 cm 土层各粒级水稳性团聚体含量

OF 和 NP 处理下 >0.25 mm 粒级水稳性大团聚体含量分别比 CF 处理增加了 148.3% 和 40.9%, OF 处理下 >0.25 mm 粒级水稳性大团聚体的含量增加幅度最大, 与 NP 处理和 CF 处理差异显著 ($p < 0.05$)。在 10—20 cm 土层, OF 和 NP 处理下 >5, 2~5, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5 mm 粒级团聚体相比于对照 CF 相

比也得到了显著增加 ($p < 0.05$), 其中 OF 和 NP 处理下 >0.25 mm 粒级水稳性大团聚体 ($R_{0.25}$) 的分布比例分别比 CF 处理增加了 138.2% 和 88.0%, OF 处理与 NP 处理间在 >0.25 mm 粒级水稳性团聚数量上差异不显著 (图 2)。综上所述, 有机肥的增施促进了新增耕地土壤水稳性团聚体的团聚胶结, 增加了水稳性大团聚体的含量。

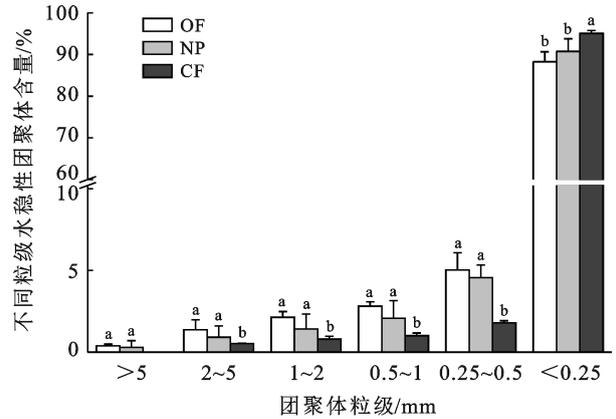


图 2 优化施肥处理下 10—20 cm 土层各粒级水稳性团聚体含量

2.2 优化施肥处理对新增耕地土壤团聚体稳定性指标 MWD, GMD, $R_{0.25}$ 和 D 的影响

湿筛法和干晒法测定的新增耕地土壤团聚体稳定性指标数据表明, 在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层中, OF 和 NP 处理下的 MWD, GMD, $R_{0.25}$ 值均高于常规 CF 处理, D 值小于 CF 处理 (表 1)。

表 1 优化施肥处理下新增耕地土壤团聚体稳定性指标的比较

方法	深度/cm	指标	OF 处理	NP 处理	CF 处理
湿筛法	0—10	MWD/mm	0.52±0.01 ^a	0.38±0.08 ^b	0.32±0.02 ^b
	10—20		0.36±0.03 ^a	0.33±0.02 ^a	0.28±0.01 ^b
	0—10	GMD/mm	0.34±0.01 ^a	0.29±0.02 ^b	0.28±0.01 ^b
	10—20		0.29±0.01 ^a	0.28±0.01 ^a	0.26±0.01 ^a
	0—10	D	2.93±0.01 ^b	2.97±0.02 ^a	2.98±0.01 ^a
	10—20		2.98±0.01 ^a	2.98±0.01 ^a	2.99±0.01 ^a
干筛法	0—10	$R_{0.25}/\%$	21.80±0.14 ^a	12.37±3.44 ^b	8.78±1.75 ^c
	10—20		11.72±2.40 ^a	9.25±3.04 ^a	4.92±0.71 ^b
	0—10	MWD/mm	2.06±0.04 ^a	1.96±0.02 ^b	1.92±0.04 ^b
	10—20		1.89±0.06 ^a	1.82±0.04 ^a	1.70±0.01 ^b
	0—10	GMD/mm	1.25±0.06 ^a	1.13±0.03 ^b	1.11±0.05 ^b
	10—20		1.08±0.14 ^a	1.05±0.04 ^a	0.96±0.06 ^a
0—10	D	2.47±0.03 ^b	2.52±0.01 ^a	2.53±0.02 ^a	
10—20		2.54±0.06 ^a	2.57±0.02 ^a	2.60±0.05 ^a	
0—10	$R_{0.25}/\%$	82.15±2.19 ^a	77.95±2.10 ^b	77.85±0.60 ^b	
10—20		78.85±1.99 ^a	77.74±0.64 ^a	74.95±0.11 ^b	

注: 小写字母表示不同条件下差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

湿筛法测定的结果显示,在0—10 cm 土层,OF 处理下的 MWD,GMD, $R_{0.25}$ 值分别比 CF 处理高 62.5%,21.4%和 148.3%, D 值比 CF 处理低 1.7%,OF 与 CF 处理间差异显著($p < 0.05$)。NP 处理下的 MWD,GMD, $R_{0.25}$ 值分别比 CF 处理高 18.8%,3.6%和 40.9%, D 值比 CF 处理低 0.3%,NP 处理与 CF 处理在 $R_{0.25}$ 值上间差异显著。在 10—20 cm 土层,OF 处理下的 MWD,GMD, $R_{0.25}$ 值分别比 CF 处理高 28.6%,11.5%和 138.2%, D 值比 CF 处理低 0.3%,OF 与 CF 处理在 MWD 和 $R_{0.25}$ 值上差异显著($p < 0.05$)。NP 处理下的 MWD,GMD, $R_{0.25}$ 值分别比 CF 处理高 17.8%,7.7%和 88.0%, D 值比 CF 处理低 0.4%,NP 与 CF 处理在 MWD 和 $R_{0.25}$ 值上差异显著($p < 0.05$)。干筛法测定的团聚体稳定性结果与湿筛法有相似的趋势,相比于 CF 处理,OF 和 NP 处理均提高了 MWD,GMD, $R_{0.25}$ 值,降低了 D 值,OF 处理下团聚体稳定性指标改善效果最好。上述结果表明,在化肥的减量施用下,有机肥添加促进了新增耕地土壤团聚体结构稳定性的提升,有利于后期新增耕地土壤的质量改善和侵蚀防治,其中 OF 处理下团聚体结构稳定性的改善效果最佳。

2.3 优化施肥处理对新增耕地土壤有机质含量的影响

相比于常规 CF 处理,在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,OF 和 NP 处理显著提高了土壤有机质含量($p < 0.05$),优化施肥处理下土壤有机质含量的大小顺序均为 $CF < NP < OF$ (图 3)。在 0—10 cm 土层,OF 和 NP 处理下有机质含量分别为 12.67 g/kg,11.79 g/kg,分别比 CF 处理提高了 46.2%和 36.1%,OF 和 NP 处理间差异不显著,OF 处理下的土壤有机

质含量最高。在 10—20 cm 土层,OF 和 NP 处理下有机质含量分别比 CF 处理提高了 59.3%和 29.6%,CF 处理下土壤有机含量最低为 7.08 g/kg。结果表明,化肥的减量施用下,有机替代对于新增耕地土壤有机质含量的提高具有显著的作用。

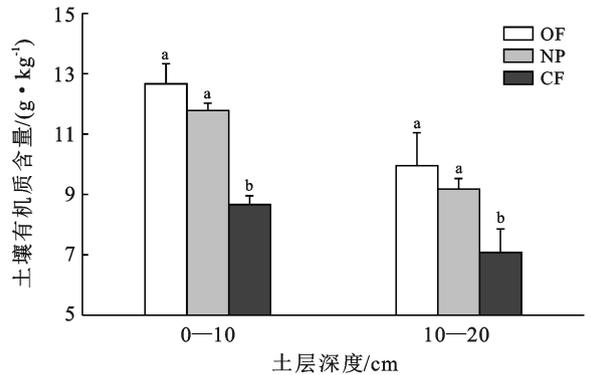


图3 优化施肥处理对新增耕地不同土层土壤有机质含量的影响

2.4 新增土壤有机含量与水稳性团聚体 MWD, GMD 间的相关关系

由图 4 可以看出,土壤有机质含量与水稳性团聚体的平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)间呈显著正相关关系(MWD, $R^2 = 0.6610$, $p < 0.0001$; GMD, $R^2 = 0.6275$, $p < 0.0001$);相关性分析数据表明随着化肥的减量施用,外源有机肥的增施促进了土壤有机质含量的增加,有利于水稳性微团聚体向水稳性大团聚的团聚,>0.25 mm 水稳性大团聚体($R_{0.25}$)含量显著增大。随着土壤有机质含量和水稳性大团聚含量的增加,土壤团聚体的 GMD,MWD 值就越高,新增耕地土壤颗粒的团聚性和水稳性越强,土壤结构的稳定性就越高。

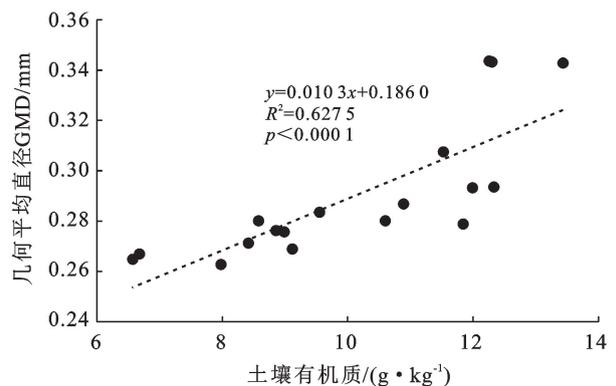
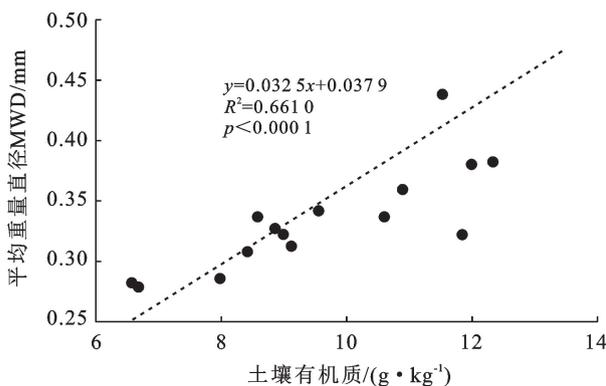


图4 优化施肥处理下团聚体结构稳定性指标 MWD,GMD 与土壤有机质之间的相关关系

2.5 优化施肥处理对新增耕地玉米生物量 and 经济效益的影响

随着有机肥的施用,玉米根系生物量、地上部分

生物量、百粒重和单株产量呈现出显著增加的趋势(表 2)。其中,OF 处理下玉米根系生物量和地上部分生物量分别比 CF 处理增加了 29.5%和 7.4%,NP

处理下玉米根系生物量和地上部分生物量分别比 CF 处理增加了 18.4% 和 5.4%，OF 处理下的增幅较大。随着玉米生物量的增加，OF 和 NP 处理下的玉米百粒重和单株产量均显著高于 CF 处理，玉米单株产量分别比 CF 处理增加了 34.5% 和 25.5%。结果表明，由于有机肥富含多种营养元素，优化施肥处理在增加土壤有机质含量和改善土壤结构的同时，促进了玉米根系和植株的生长发育，增加了新增耕地玉米的生物

量和经济产量。OF 和 NP 处理下玉米的产量分别比 CF 处理增加了 24.5% 和 35.5%，但由于折算等养分的处理下有机肥的施用量较大，OF 和 NP 处理下的肥料投入成本比 CF 处理的高，导致 OF 和 NP 处理下的产投比与 CF 处理差异不显著。总体而言，优化施肥方式下的 OF 和 NP 处理对土壤质量的提升是单施化肥所不能相比的，对于新增耕地土壤的健康可持续发展及作物品质的提升具有明显的优势^[22]。

表 2 优化施肥处理对玉米生物量 and 经济效益的影响

处理	根系生物量/g	地上部分生物量/g	百粒重/g	单株产量/g	肥料投入/(元·hm ⁻²)	折合产值/(元·hm ⁻²)	产投比
CF	22.23 ^c	101.15 ^c	26.52 ^b	96.90 ^b	3 234 ^b	13 989 ^b	4.33 ^a
NP	26.32 ^b	106.65 ^b	29.43 ^a	121.60 ^a	4 045 ^a	17 559 ^a	4.34 ^a
OF	28.78 ^a	108.89 ^a	30.24 ^a	130.32 ^a	4 374 ^a	18 813 ^a	4.30 ^a

3 讨论

土壤有机质是反映土壤肥力状况和理化性质的重要指标，在改善土壤结构，维持土壤生产力方面起着关键作用^[15,23]。OF 和 NP 处理由于化肥的减量施用，外源有机肥的输入可以直接向土壤中补充大量活性有机物质和丰富均衡的营养元素，提高土壤有机质含量，促进作物的生长发育，而且植物残体和根系的归还量也会高于 CF 处理，因此对新整治耕地有机质含量有着显著的提升，有助于增加新增耕地土壤的保肥供肥能力，这与付威等^[24]和 Song 等^[25]的研究结果相似，他们的研究表明外源有机肥的施用有利于黑土等耕地土壤有机质含量的提高。但由于土地整治后新增耕地土壤不同于传统的耕种多年的土壤，存在成熟度低、结构差、生产力低等问题^[6-7]，亟需改善其结构和肥力特性，优化施肥处理在新增耕地土壤有机质含量的提升幅度上要高于传统的耕地土壤。而 CF 处理由于单一施用化肥没有外源有机物质的输入，加之可能因作物对不同电荷离子的选择吸收、土壤吸附作用差异等因素加剧了对土壤阳离子损失，导致土壤有机质含量的不断减少^[26-27]。

土壤结构稳定性和抗侵蚀能力取决于稳定团聚体的数量，大团聚体被认为是土壤中的优质结构体，是评价土壤质量和抗侵蚀能力的重要指标，其含量越高，土壤的结构稳定性和肥力状况越好^[28-29]。本研究中 OF 与 NP 处理下水稳性和机械稳定性大团聚体比例增加的可能原因是化肥的减量施用以及外源有机肥的输入，缓解了土壤的板结恶化现象，增加了土壤有机质含量，而有机质是土壤团聚体形成和稳定的重要胶结物质，促使微团聚体向大团聚体的胶结团

聚，从而增加大团聚体的含量，改善了土壤结构。这些研究结果表明，化肥的减量施用下，外源有机肥的施用有助于提高新整治耕地土壤团聚体的胶结团聚能力，增强土壤的结构稳定性和抗侵蚀能力。我们的结果与付威等^[24]和 Meng 等^[30]的研究结果相似。Meng 等发现外源有机肥的施用对土壤团聚体的分布有重要影响，可以显著的提高水稳性大团聚的数量，改善土壤结构，但由于新增耕地处于土壤熟化的早期，其结构改善对于后期肥力和生产力提升非常关键，相比于传统耕地土壤，优化施肥方式将对新增耕地土壤团聚体形成和结构稳定产生更为重要的促进作用。

MWD, GMD, $R_{0.25}$, D 是反映土壤团聚体粒径几何形状与稳定性的重要指标，土壤团聚体的 MWD, GMD, $R_{0.25}$ 值越高，D 值越小，表明土壤的团聚性和稳定性越好，土壤结构性越好^[20,27]。相比于原始土样和常规 CF 处理，OF 和 NP 处理均增强了新增耕地土壤的团聚性和稳定性，改善了土壤结构，在增强土壤抗侵蚀能力、保持结构稳定性方面具有积极的作用。其中，OF 处理对于团聚体的团聚性和稳定性的改善效果最好。分析原因可能是土壤有机质含量的高低与土壤团聚体的形成和稳定性密切相关，在等量养分投入量下，OF 处理施用的有机肥比 NP 处理施用的有机肥量更大，增加土壤有机质的作用更明显，而有机质是土壤团聚体形成和稳定的重要胶结物质，这些重要的有机胶结物质增强了团聚体的团聚粘结力，对土壤团聚体的形成和稳定将产生更为积极的促进作用^[12,31]。

新增耕地土壤有机质含量与团聚体的平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)呈显著正相关关

系。这些研究结果与赵红等^[31]和Wang等^[32]的研究结果相似,赵红等和Wang等的研究表明与常规施用化肥相比,优化施肥方式下的土壤有机质含量与团聚体的数量和结构稳定性呈正相关关系,促进了水稳性大团聚的形成和团聚体结构稳定性的改善,而且优化施肥方式对新增耕地团聚体GMD,MWD值和结构稳定性改善程度要好于传统耕种多年的土壤。同时,OF和NP处理对于新增耕地玉米生物量和经济效益也产生了一定的影响,玉米产量和经济效益显著高于CF处理^[33]。但由于有机肥的有效养分投入成本高于化肥,OF和NP处理的产投比与CF处理差异不明显,但对于新增耕地土壤的健康可持续发展、作物品质的提升和环境的改善要具有明显的优势^[34-36]。综上所述,优化施肥方式下OF和NP处理在提高土壤有机质含量的同时,能显著增加土壤中水稳性大团聚体含量及其结构稳定性,提高玉米的产量,是增加新整治耕地土壤肥力、结构稳定性和生产力的有效措施。

4 结论

相比于常规CF处理,化肥有机替代方式下的OF和NP处理显著增加了新增耕地土壤有机质含量,提高了团聚体的MWD,GMD, $R_{0.25}$ 值,降低了D值,增加了玉米产量($p < 0.05$),土壤团聚体结构和稳定性明显得到改善,其中OF处理对新整治耕地土壤保肥特性、团聚体数量和结构稳定性的改善效果最佳。土壤有机质含量与水稳性团聚体的平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)呈显著正相关关系($p < 0.001$),表明随着化肥的减量施用,外源有机肥的加入有利于土壤有机质含量的增大,促进了 >0.25 mm水稳性大团聚体的团聚,提高了新增耕地土壤的团聚体数量和结构稳定性。因此,这些结果证实了优化施肥方式下的OF和NP处理对黄土高原地区新整治耕地土壤肥力提升、团聚体数量增加与结构改善的益处,是有利于提高新增耕地土壤质量、土地生产力和健康可持续发展的有效措施。

[参 考 文 献]

- [1] 刘彦随,冯巍仑,李裕瑞.现代农业地理工程与农业高质量发展:以黄土丘陵沟壑区为例[J].地理学报,2020,75(10):2029-2046.
- [2] 张红,吕家珑,赵世伟,等.不同植被覆盖下子午岭土壤养分状况研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):66-69.
- [3] Liu Yansui, Li Jintao, Yang Yuanyuan. Strategic adjustment of land use policy under the economic transformation [J]. Land Use Policy, 2018,74,5-14.
- [4] 刘彦随.科学推进中国农村土地整治战略[J].中国土地科学,2011,25(4):3-8.
- [5] 赵瑞,吴克宁,陈甜倩.面向土地整治的耕地质量评价优化[J].生态学杂志,2019,38(8):2433-2441.
- [6] 黄云鑫,李裕瑞,刘彦随,等.不同土层复配方案对土壤水稳性团聚体及有机质的影响[J].农业资源与环境学报,2020,37(6):894-903.
- [7] 李航,刘建华,耿其明,等.低山丘陵区不同地形部位新增耕地土壤侵蚀特征研究[J].林业与生态科学,2019,34(4):401-408.
- [8] 温延臣,李燕青,袁亮,等.长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J].农业工程学报,2015,31(7):91-99.
- [9] Gong Wei, Yan Xiaoyuan, Wang Jingyan, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in Northern China [J]. Geoderma, 2009,149(3/4):318-324.
- [10] 刘钦普.中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J].农业工程学报,2017,33(6):214-221.
- [11] 唐汉,王金武,徐常塑,等.化肥减施增效关键技术研究进展分析[J].农业机械学报,2019,50(4):1-19.
- [12] Liu Zhe, Han Jichang, Sun Zenghui, et al. Long-term effects of different planting patterns on greenhouse soil micromorphological features in the North China Plain [J]. Scientific Reports, 2019,9(1):2200.
- [13] 王改兰,段建南,贾宁凤,等.长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2006,20(4):82-85.
- [14] Xin Xuli, Zhang Jiabao, Zhu Anning, et al. Effects of long-term(23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvo-aquic soil in the North China Plain [J]. Soil and Tillage Research, 2016,156,166-172.
- [15] 吕欣欣,丁雪丽,张彬,等.长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响[J].农业资源与环境学报,2018,35(1):1-10.
- [16] 陈怡平,骆世明,李凤民,等.对延安黄土沟壑区农业可持续发展的建议[J].地球环境学报,2015,6(5):265-269.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2008.
- [18] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregates Stability and Size Distribution, Methods of Soil Analysis(Part4:Physical Methods)[M]// Soil Science Society of America Journal, Madison, Wisconsin, USA, 2002,317-328.
- [19] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between(micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004,79,7-31.
- [20] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤

- 团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007(9):1973-1979.
- [21] 刘哲,韩霖昌,孙增慧,等. $\delta^{13}\text{C}$ 法研究砂姜黑土添加秸秆后团聚体有机碳变化规律[J].农业工程学报,2017,33(14):179-187.
- [22] 徐明岗,李冬初,李菊梅,等.化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J].中国农业科学,2008,41(10):3133-3139.
- [23] Reeves D W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems [J]. Soil and Tillage Research, 1997,43(1/2):131-167.
- [24] 付威,雍晨旭,马东豪,等.黄土丘陵沟壑区治沟造地土壤快速培肥效应[J].农业工程学报,2019,35(21):252-261.
- [25] Song Z W, Zhu P, Gao H J, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon content and aggregate composition under continuous maize cropping in Northeast China [J]. Journal of Agricultural Science, 2015,153(2):236-244.
- [26] 张瑞,张贵龙,姬艳艳,等.不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J].环境科学,2013,34(1):277-282.
- [27] 刘哲,孙增慧,吕贻忠.长期不同施肥方式对华北地区温室和农田土壤团聚体形成特征的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(8):1119-1128.
- [28] Verchot L V, Dutaur L, Shepherd K D, et al. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils [J]. Geoderma, 2011, 161 (3/4):182-193.
- [29] 梁爱珍,张晓平,申艳,等.东北黑土水稳性团聚体及其结合碳分布特征[J].应用生态学报,2008,19(5):1052-1057.
- [30] Meng Qingfeng, Sun Yuting, Zhao Jing, et al. Distribution of carbon and nitrogen in water-stable aggregates and soil stability under long-term manure application in solonchic soils of the Songnen Plain, Northeast China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14 (6):1041-1049.
- [31] 赵红,袁培民,吕贻忠,等.施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J].土壤,2011,43(2):306-311.
- [32] Wang Fang, Tong Yanan, Zhang Jinshui, et al. Effects of various organic materials on soil aggregate stability and soil microbiological properties on the Loess Plateau of China [J]. Plant, Soil and Environment, 2013,59, 162-168.
- [33] Tovihoudji P G, Akponikpè P B I, Adjogboto A, et al. Combining hill-placed manure and mineral fertilizer enhances maize productivity and profitability in Northern Benin [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, 110(3):375-393.
- [34] 刘洪涛,陈同斌,郑国砥,等.有机肥与化肥的生产能耗、投入成本和环境效益比较分析:以污泥堆肥生产有机肥为例[J].生态环境学报,2010,19(4):1000-1003.
- [35] 蒋倩红,陆志峰,赵海燕,等.长江中下游冬油菜产区有机无机肥配施下减氮增效潜力分析[J].中国农业科学,2020,53(14):2907-2918.
- [36] 简少芬,钟楚,谭桂玉,等.有机种植对环境和作物品质特征的研究进展[J].北方园艺,2020(12):148-154.

(上接第 98 页)

- [20] 孟红旗,赵同谦,徐华山,等.河岸带耕地降雨径流产流特征分析[J].农业环境科学学报,2009,28(4):749-754.
- [21] 文慧,倪世民,冯舒悦,等.赣南崩岗的发育阶段及部位对土壤水力性质的影响[J].农业工程学报,2019,35(24):136-143.
- [22] 牛晓倩,贾小旭,刘成功,等.关中平原农田土壤水力参数空间分异与模拟[J].水土保持学报,2021,35(1):198-204.
- [23] 李源,宋维峰,马建刚.中国西南水梯田土壤水分特性研究:以哈尼梯田为例[J].水土保持学报,2021,35(2):160-169.
- [24] 陈印平,夏江宝,刘俊华.不同农田防护林下盐碱地土壤水分特征曲线差异对比[J].中国水土保持科学,2019,17(5):18-24.
- [25] 王辉,杨小宝,田大作,等.紫鹊界梯田区不同土地利用类型土壤入渗特征研究[J].灌溉排水学报,2012,31(5):123-126.
- [26] 冯天骄,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性[J].环境科学,2017,38(9):3860-3870.